УДК 553.311

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ СКАРНОВО-ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ. Ч. 1.

В.Г. Ворошилов

Томский политехнический университет
E-mail: voroshilovvg@ign.tpu.ru

Исследована геохимическая зональность золото-скарновых месторождений Западной Сибири. Выявлено концентрически зональное строение аномальных структур геохимических полей, сопровождающих изученные месторождения. Определены группы концентрирующихся и деконцентрирующихся (по отношению к золоторудным телам) элементов. Установлена тесная пространственная связь золота с комплексом халькофильных элементов-спутников, набор которых может изменяться в зависимости от степени эволюции гидротермальной системы. Набор деконцентрирующихся элементов, накапливающихся по периферии рудных тел, в целом стандартный и включает в себя Ni, Co, Cr, V, Ba, Mn. В первой части статьи рассматривается геохимическая зональность месторождений синюхинского типа, вторая посвящена зональности Казского рудного поля и обсуждению результатов.

Скарново-золоторудные месторождения достаточно широко распространены в складчатых структурах Алтае-Саянской складчатой области, но их промышленная оценка всегда сопряжена со значительными трудностями. Рудные тела таких месторождений, как правило, характеризуются высокими концентрациями хорошо извлекаемого золота, но имеют обычно очень сложную морфологию и небольшие размеры. В этих условиях объективная оценка новых рудопроявлений возможна с использованием комплексных геохимических критериев, разработанных и апробированных на хорошо изученных месторождениях.

По соотношению с сопутствующим магнетитовым оруденением скарново-золоторудные месторождения Алтае-Саянской складчатой области образуют непрерывный ряд, в пределах которого можно выделить два крайних типа, различающихся по геолого-промышленной специализации: 1) золоторудные и медно-золоторудные и 2) золото-магнетитовые. В качестве эталонных объектов для исследования геохимической зональности нами выбраны: для первой группы – Синюхинское рудное поле (Горный Алтай), для второй группы – Казское рудное поле (Горная Шория). В первой части статьи рассматривается геохимическая зональность месторождений синюхинского типа, вторая посвящена зональности Казского рудного поля и обсуждению результатов.

Наиболее ранние геологические комплексы Синюхинского рудного поля являются продуктами позднеостроводужного этапа ($Є_2$–$Є_3$) развития Сарысазского сектора Алтае-Северосаянского вулкано-плутонического пояса [1]. Этап знаменуется накоплением вулканогенно-осадочных толщ, сопровождавшихся субаэральными излияниями базальтов, андезитов, андезибазальтов усть-семинской свиты ($Є_2$). Основные вулканиты относятся к низкокалиевой серии нормальной щёлочности и классифицируются известково-щелочными базальтами островных дуг [2]. Толща содержит пласты, линзы и биогермные массивы известняков, благоприятные для формирования золото-скарнового оруденения.

Интрузивный магматизм этого периода представлен Саракокшинским массивом ($Є_3$), в котором картируются габброиды и плагиограниты. По данным Sm-Nd изотопного датирования плагиограниты Саракокшинского массива имеют возраст 587 млн лет [3].

К образованиям Салаиро-Алтайского девонско-раннекаменноугольного вулкано-плутонического пояса относятся гомодромно построенные вулканиты повышенной щелочности нырнинско-саганской серии и гранитоиды синюхинского комплекса.

Синюхинский плутонический диорит-тоналитовый комплекс (D_1) сложен породами 4 фаз: 1) габбро; 2) диориты, кварцевые диориты; 3) тоналиты, гранодиориты; 4) граниты. Уран-свинцовым датированием по циркону из кварцевых диоритов получена цифра 400±28 млн лет [3]. По петрогеохимическим показателям гранитоиды комплекса относятся к слабо контаминированным гранитам I-типа андезитового ряда. С гранитоидами комплекса связаны золото-медно-скарновые месторождения Синюхинского рудного поля.

Промышленное золотое оруденение приурочено к стратиформным залежам инфильтрационных известковых скарнов, сформировавшихся на контактах известняков и вулканитов. Золотоносность их обусловлена наложенными процессами окварцевания и сульфидизации. Ниже, в табл. 1, 2 скарны с наложенной минерализацией для краткости поименованы «рудными», без нее – «безрудными». Установлено зональное размещение как скарновых, так и рудных минералов, относительно узлов сочленения разрывных нарушений, плоскостей отслоений в складках и других высокопроницаемых структур.

Волластонит инфильтрационных скарнов формируется лишь в участках интенсивной циркуляции растворов (пересечение систем дизъюнктивов различных направлений, сопряжение их с благоприятными пликативными структурами и т. д.). С удалением от этих структур волластонитовые скарны сменяются гранатовыми и далее – гранат-пи-

роксеновыми и пироксеновыми. Еще дальше развиваются пропилитоподобные околоскарновые метасоматиты актинолит-альбит-калишпат-эпидот-хлоритового состава, окаймляющие залежи скарнов по простиранию и по мощности. По существу, эти метасоматиты являются внешней зоной колонки инфильтрационных скарнов.

Распределение рудных минералов корреспондирует составу скарнов, что в определенной степени связано с унаследованностью флюидопроницаемых структур в процессах скарнирования и рудоотложения. На периферии рудных тел, в гранат-пироксеновых и пироксеновых скарнах, развита магнетитовая минерализация с секущими прожилками более поздних пирита, реже пирротина и арсенопирита. Вкрапленность пирита развита также в околоскарновых метасоматитах. По мере приближения к золоторудным телам, в зоне развития гранатовых скарнов, пирит, пирротин, магнетит сменяются существенно халькопиритовой (с более редкими сфалеритом, галенитом) минерализацией. В зоне пространственного совмещения названных минеральных ассоциаций устанавливается более поздний возраст халькопирита, галенита и сфалерита по отношению к пириту и магнетиту (секущие прожилки, цементация и обрастание раздробленных зерен). Галенит и сфалерит при этом тяготеют к внешней границе ареалов халькопирита.

Промышленные золоторудные тела концентрируются в волластонитовых, гранат-волластонитовых скарнах, где продуктивная минерализация представлена, в основном, борнит-халькозиновой ассоциацией с вкрапленностью золота, нередко с теллуридами и сульфосолями. Борнит и халькозин образовались одновременно и характеризуются структурами взаимного прорастания. Взаимоотношения их с халькопиритом также свидетельствуют о синхронности отложения всех трех минералов. Пространственная же разобщенность связана с различиями в составе исходного субстрата: борнит и халькозин отлагались в скарнах, образовавшихся по известнякам, а халькопирит характерен для апотуфовых скарнов. Наиболее поздними рудными минералами являются теллуриды и сульфосоли, встречающиеся в виде вкрапленности и микропрожилков в борните. В целом зональность в размещении перечисленных минералов, от периферии рудных тел к центру, выглядит следующим образом: магнетит→пирит, пирротин, магнетит→галенит, сфалерит→халькопирит→борнит, халькозин, теллуриды и сульфосоли. Описанная зональность однотипна для различных иерархических уровней, от рудного поля до рудных столбов включительно и может быть классифицирована как сочетание центростремительной стадийной зональности с зональностью отложения, связанной с составом пород.

Исследование аномальных геохимических полей проведено нами в соответствии с ранее опубликованной методикой [4]. Исходными данными являются результаты геохимического картирования керна скважин и подземных горных выработок, выполненного коллективом Синюхинской геологосъемочной партии и лично автором. Всего использовано более 13000 проб. По всем пробам выполнены спектральный полуколичественный, спектрозолотометрический, частично пробирный (на золото и серебро) анализы. Использованы также данные химического силикатного анализа основных разновидностей пород и руд, пересчитанные по атомно-объемному методу Ю.В. Казицына и В.А. Рудника [5].

Поскольку распределение золота и элементов-примесей во всех типах пород не соответствует нормальному закону и аппроксимируется логнормальной моделью, в качестве оценки среднего использовалось среднее геометрическое, а разброс значений оценивался с помощью стандартного множителя.

По данным силикатного и спектрального анализов скарны, в сравнении с исходными породами, обогащены марганцем (в 2...3 раза), а околоскарновые метасоматиты – калием и натрием (в 1,3...1,5 раза). При наложении на скарны кварцево-золото-сульфидной минерализации отмечается существенный, до 1000...5000 КК (коэффициентов концентрации относительно кларка) привнос Au, Ag, Bi, Te, As; до 500 КК Cu, Sb; до 200 КК Zn, Pb; до 10 КК Co, Ni, V.

Для выявления и характеристики геохимической зональности использованы показатели: 1) геохимические ассоциации коррелирующихся элементов, выявленные факторным анализом; 2) коэффициенты относительной концентрации (ОК) элементов Co:Ni, Pb:Zn [6]; 3) энергия рудообразования [7].

Интенсивность проявления геохимических ассоциаций количественно определялась как значения факторов. Факторным анализом в Синюхинском рудном поле выявлено три геохимических ассоциации коррелирующихся элементов, которые можно представить в виде уравнений регрессии:

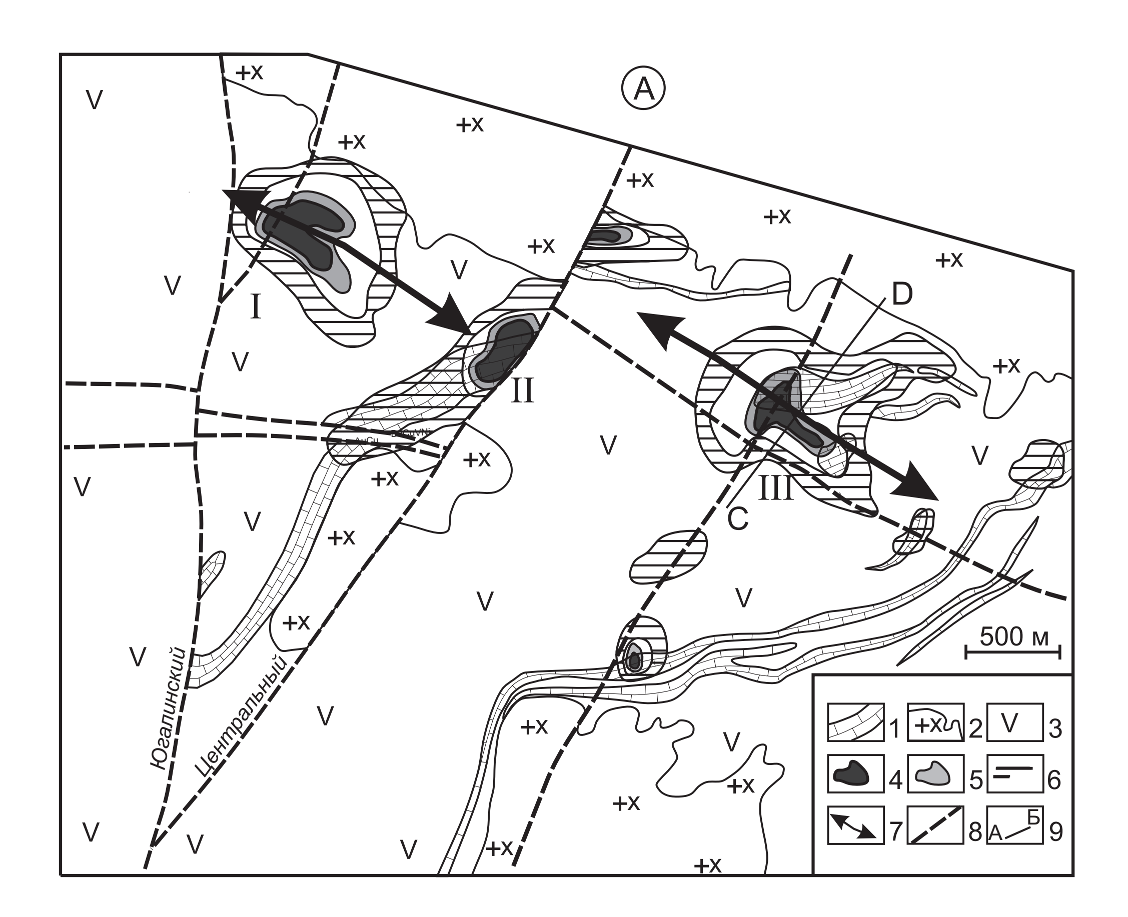
1) $F1=0,34Au+0,33Ag+0,32Cu$;

2) $F2=0,52Ni+0,51V+0,28Co$;

3) $F3=0,43Zn+0,34Pb$.

Содержания элементов выражены в геофонах (отношение содержания элемента в пробе к его фоновому содержанию в соответствующих породах). Для сульфидизированных скарнов в качестве фона приняты «безрудные» скарны. Фоновые значения вычисленных показателей и их максимально возможный разброс в породах разного состава рассчитаны согласно Инструкции [9] по стандартной методике (табл. 1).

Выявленные геохимические ассоциации отражают реальные минеральные парагенезисы руд. В первую ассоциацию (F1) входят золото и наиболее тесно связанные с ним серебро и медь. По данным изучения мономинеральных фракций наиболее обогащены золотом и серебром борнит и халькозин, поэтому максимальные значения этого пока-



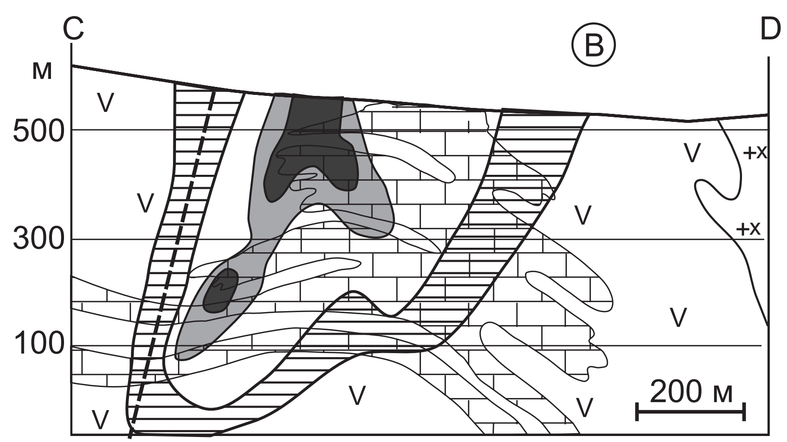


Рис. 1. Распределение геохимических ассоциаций в первичных ореолах Синюхинского рудного поля: А) план поверхности, В) разрез по линии CD: 1) известняки; 2) гранитоиды синюхинского комплекса; 3) вулканогенная толща; 4) ядерные зоны аномальных геохимических структур, представленные ассоциацией Au, Ag, Cu (F1>2,7) и соответствующие месторождениям: I) Западному, II) Первому Рудному, III) Фаифановскому; 5) участки развития ассоциации Pb, Zn (F3>3,62); 6) фронтальные зоны накопления Co, Ni, V (F2>8,8); 7) оси антиклинальных складок; 8) основные разрывные нарушения; 9) линия разреза

зателя (до 2980) характерны для центральных частей золоторудных тел и закономерно убывают по мере их выклинивания. Фоновые значения F1 не превышают 2,7. Аномальные (свыше 3,62) значения показателя F3 (Pb, Zn) также характерны для сульфидизированных скарнов, но приурочены к флангам золоторудных тел, где проявлена галенит-сфалеритовая минерализация. Максимальные концентрации Co, Ni, V установлены в мономинеральных фракциях пирита из внешнего обрамления рудных тел. В других сульфидных минералах содержания этих элементов на порядок ниже. Аномалии F2 (свыше 8,88) окаймляют золото-скарновые тела в плане и вертикальных разрезах, поэтому данную ассоциацию можно считать индикатором периферии рудных тел.

Таблица 1. *Параметры распределения значений факторов (ассоциаций элементов) в исходных породах, метасоматитах и рудах Синюхинского рудного поля*

Породы	F1=0,34Au+0,33Ag+0,32Cu			F2=0,52Ni+0,51V+0,28Co			F3=0,43Zn+0,34Pb		
	$\tilde{\tilde{X}}$	ε	Δ	$\tilde{\tilde{X}}$	ε	Δ	$\tilde{\tilde{X}}$	ε	Δ
Базальты, андезибазальты	0,98	1,26	0,49...1,96	0,70	1,7	0,14...3,44	0,63	1,4	0,23...1,73
Известняки	0,96	0,04	0,46...2,01	0,66	1,8	0,11...3,85	0,62	1,7	0,13...3,05
Гранодиориты	0,85	0,03	0,45...1,62	0,68	1,6	0,17...2,79	0,71	1,6	0,17...2,91
Околоскарновые метасоматиты	1,2	1,31	0,53...2,70	0,73	2,3	0,06...8,88	0,62	1,8	0,11...3,62
Скарны «безрудные»	1,2	1,28	0,57...2,52	0,71	1,8	0,12...4,14	0,65	1,6	0,16...2,66
Скарны «рудные»	35,0	4,4	0,4...2980	0,45	2,0	0,06...3,6	3,5	5,3	0,02...521

Примечание. $\tilde{\tilde{X}}$ *– среднее геометрическое;* ε *– стандартный множитель;* Δ *– разброс значений при доверительной вероятности 0,99*

В целом в пределах Синюхинского рудного поля геометризуются три аномальные структуры геохимического поля (АСГП), соответствующие наиболее продуктивным золоторудным участкам (месторождениям): Западному, Первому Рудному и Фаифановскому (рис. 1).

Ядерные зоны структур представлены ассоциацией Au, Cu, Ag, которая окаймляется аномалиями показателя F2 (Pb, Zn). Во фронтальных зонах накапливаются Co, Ni, V. Наиболее продуктивная рудная минерализация приурочена к узлам пересечения шарниров антиклинальных складок поперечными крутопадающими разрывами. Аналогичный характер соотношения геохимических ассоциаций отмечается и в вертикальных разрезах месторождений (рис. 1, В).

Выбор коэффициентов относительной концентрации (ОК) близких по геохимическим свойствам элементов в качестве индикаторов зональности обусловлен закономерным возрастанием их значений и дисперсии в ходе эволюции гидротермальных систем [6].

Таблица 2. *Параметры распределения значений коэффициентов относительной концентрации (ОК) элементов в породах Синюхинского рудного поля*

Породы	ОК					
	Co:Ni			Pb:Zn		
	$\tilde{X}$	ε	Δ	$\tilde{X}$	ε	Δ
Базальты, андезибазальты	12,2	1,10	9,2...16,1	9,4	1,23	5,0...17,6
Известняки	7,8	1,10	5,8...10,5	9,1	1,26	4,5...18,2
Гранодиориты	8,5	1,12	6,0...12,0	8,5	1,32	3,7...19,6
Околоскарновые метасоматиты	16,4	1,22	9,0...30,0	10,5	1,56	2,8...40,0
Скарны «безрудные»	18,6	1,39	6,9...50,0	12,2	1,60	2,9...50,6
Скарны «рудные»	55,3	1,67	11,9...256	35,4	3,24	1,0...1200

Примечание. 1) Отношения содержаний элементов нормированы на их отношения в хондритах; 2) $\tilde{X}$ *– среднее геометрическое;* ε *– стандартный множитель;* $\bar{X}$ *– среднее арифметическое; S – стандартное отклонение;* Δ *– разброс значений при доверительной вероятности 0,99*

Значения показателей в рудовмещающих вулканогенно-карбонатных породах и рудогенерирующих гранитоидах близки к кларковым соотношениям. Минимально-аномальные значения показателей в этих породах приняты нами в качестве исходных уровней их геометризации в метасоматитах и рудах (табл. 2). Значения рассмотренных показателей ОК устойчиво возрастают по мере роста интенсивности гидротермального процесса и достигают максимумов в сульфидизированных скарнах. В то же время, по отношению к золоторудным телам аномалии ОК занимают периферическое положение, окаймляя их с флангов (рис. 2, I). При этом максимальные значения ОК Co:Ni характерны для подрудного пространства, а ОК Pb:Zn – для надрудно-верхнерудного. Отмечается также прямая пропорциональная зависимость между величиной показателей ОК и масштабами золоторудных тел.

Энергия рудообразования $E=\Sigma[KK_i \cdot LN(KK_i)]$ характеризует общую интенсивность перераспределения химических элементов относительно кларковых уровней. Здесь KK_i – кларк концентрации элемента с номером i [7]. Поскольку речь идет о перераспределении элементов в рамках рудного поля, кларки концентраций заменены нами на геофоны. Геофоны неизмененных вулканогенно-карбонатных пород и гранитоидов рассчитывались относительно фоновых содержаний элементов в этих породах, поэтому среднее значение E в них равно 0. Для скарнов и околоскарновых метасоматитов в качестве точки отсчета приняты усредненные фоновые содержания в породах исходного субстрата. Теоретически безразмерный показатель E может принимать как положительные (привнос элементов), так и отрицательные (их вынос) значения, а при отсутствии существенного перераспределения элементов стремится к нулю. Поскольку в рудном поле фиксируется 2 группы элементов, противоположных по характеру пространственного соотношения с золотым оруденением, целесообразно рассчитывать энергию рудообразования раздельно для групп концентрирующихся (Au, Cu, Ag, Bi, As, Pb, Zn) и деконцентрирующихся (Ni, Co, V, Ba) элементов и использовать их для количественной оценки масштабов перераспределения вещества.

Вычисление фоновых и минимально-аномальных уровней для энергии рудообразования по стандартной методике [8] невозможно из-за наличия отрицательных значений показателей. Поэтому вычисление этих границ произведено исходя из фоновых

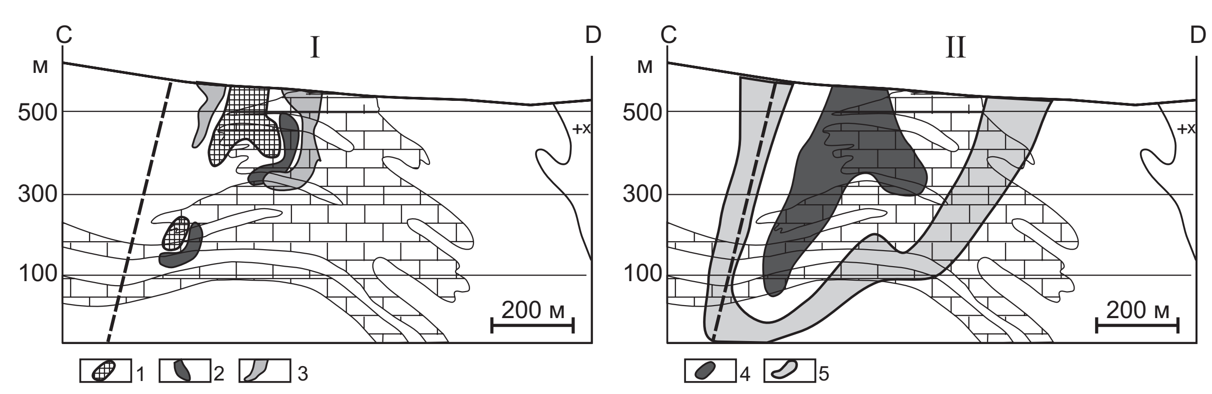


Рис. 2. *Распределение аномалий I) коэффициентов относительной концентрации (ОК) элементов и II) энергии рудообразования (Е) в разрезе через Фаифановское месторождение: 1) золоторудные тела; аномалии ОК: 2) Co:Ni; 3) Pb:Zn; аномалии $E_{деконц}$: 4) отрицательные (меньше –1,5); 5) положительные (больше 9,0)*

и минимально-аномальных значений для элементов, участвующих в расчете энергии рудообразования. Рассчитанные пределы фона для $E_{конц}$ колеблются от –2,0 до 70, а для $E_{деконц}$ – от –1,5 до 9,0 (табл. 3). Эти границы приняты нами в качестве минимально-аномальных уровней при геометризации значений энергии рудообразования. В скарнах и околоскарновых метасоматитах наблюдается возрастание как среднего значения, так и дисперсии рассчитанных показателей. Максимальные значения $E_{конц}$ (до 55000) характерны для золоторудных тел, а минимальные (до –2,0) – для околоскарновых метасоматитов.

Таблица 3. *Пределы колебаний показателей энергии рудообразования для концентрирующихся ($E_{конц}$) и деконцентрирующихся ($E_{деконц}$) элементов в породах Синюхинского рудного поля*

Породы	$E_{конц}$	$E_{деконц}$
Базальты, андезибазальты	–1,6...62	–0,7...8,5
Известняки	–1,8...68	–1,4...5,6
Гранодиориты	–1,2...56	–0,7...7,5
Околоскарновые метасоматиты	–2,0...70	–0,5...80,0
Скарны «безрудные»	–1,5...50	–1,5...9,0
Скарны «рудные»	50...55000	–2,0...5,2

Положительные аномалии показателя $E_{деконц}$ (до 80,0) характерны для околоскарновых метасоматитов на периферии скарново-золоторудных тел, минимальные значения (до –2,0) отмечаются в центральных частях рудных тел, что позволяет говорить о выносе и перераспределении деконцентрирующихся элементов в процессе рудоотложения.

Заключение

Скарново-золоторудные месторождения Синюхинского рудного поля Алтае-Саянской складчатой области сопровождаются концентрически зональными аномальными структурами геохимических полей. Центростремительный характер зональности выражается в смене ранних минеральных парагенезисов поздними от периферии структур к их центрам. Золото наиболее тесно связано с Cu и Ag.

С ростом интенсивности гидротермального процесса возрастают средние значения и дисперсии коэффициентов относительной концентрации Co:Ni и Pb:Zn, аномалии которых приурочены к периферии рудных тел. Отмечается прямая связь между величиной этих коэффициентов и масштабами золоторудных тел.

Установлен пространственный антагонизм в размещении концентрирующихся (Au, Cu, Ag, Bi, As, Pb, Zn) и деконцентрирующихся (Ni, Co, V, Ba) элементов. Интенсивность перераспределения этих групп элементов, как отражение масштабности гидротермального процесса, предлагается оценивать с помощью количественных показателей энергии рудообразования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шокальский С.П., Бабин Г.А., Владимиров А.Г., Борисов С.М. и др. Корреляция магматических и метаморфических комплексов западной части Алтае-Саянской складчатой области. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2000. – 187 с.
2. Гусев А.И. Металлогения золота Горного Алтая и южной части Горной Шории. – Томск: STT, 2003. – 350 с.
3. Крук Н.Н., Владимиров А.Г., Руднев С.Н., Журавлёв Д.З. Sm-Nd изотопная систематика гранитоидов западной части Алтае-Саянской складчатой области // Доклады РАН. – 1999. – Т. 366. – № 3. – С. 395–397.
4. Ворошилов В.Г. Методика выявления структуры аномальных геохимических полей рудных месторождений // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 2. – С. 55–61.
5. Казицын Ю.В., Рудник В.А. Руководство к расчету баланса вещества и внутренней энергии при формировании метасоматических пород. – М.: Недра, 1968. – 363 с.
6. Щербаков Ю.Г. Геохимические индикаторы золоторудных полей // Геология и геофизика. – 1995. – Т. 36. – № 9. – С. 42–52.
7. Сафронов Н.И., Мещеряков С.С., Иванов Н.П. Энергия рудообразования и поиски полезных ископаемых. – Л.: Недра, 1978. – 265 с.
8. Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений / Под ред. Л.Н. Овчинникова. – М.: Недра, 1983. – 198 с.

Поступила 04.09.2006 г.